

# IMPLEMENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DE DOIS MÉTODOS PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE RUÍDO: *OBSERVAÇÃO* E *CÁLCULO*

Ventura, Judite

ESTG, Instituto Politécnico de Leiria  
(judite.ventura@ipleiria.pt)

## Resumo

Problemas de saúde relacionados com a exposição prolongada a níveis elevados de ruído têm originado uma crescente preocupação em conhecer e quantificar a distribuição espacial de níveis sonoros.

Neste âmbito, foram elaborados mapas de ruído para o *campus 2* do Instituto Politécnico de Leiria, implementando e comparando os métodos de *cálculo* e de *observação*.

Resumidamente, o método de *observação* é baseado nos valores das medições de ruído ambiente, realizadas no interior e nas imediações do *campus*, utilizando a técnica de interpolação *kriging* (ArcGis 9.3). O resultado foi comparado com o mapa de ruído obtido pelo método de *cálculo* utilizando o *software* de previsão acústica CadnaA.

Como principais conclusões é de referir que o CadnaA é mais rigoroso do que o *kriging* mas com um tempo de cálculo muito superior. O *kriging* revelou-se um método de interpolação com capacidade de produzir bons resultados no entanto torna-se necessário aumentar a sua precisão, por exemplo, aumentando o número de pontos medidos e/ou contornando o problema das distâncias Euclidianas que existe na maioria dos interpoladores.

**Palavras-chave:** *kriging*, geoestatística, mapa de ruído, CadnaA.

## Abstract

Health issues related to long term exposure to high noise levels have led to a growing concern to know and quantify the spatial distribution of sound levels.

In this context, noise maps were prepared for the *campus 2* of the Polytechnic Institute of Leiria, implementing and comparing the methods of *calculation* and *observation*.

Briefly, the *observation* method is based on the values of the environment noise measurements, carried out inside and around the campus, using the technique of *kriging* interpolation (ArcGis 9.3). The result was compared with the noise map obtained by the *calculation* method using the prediction noise software CadnaA.

As main conclusions, I can highlight that: the CadnaA is more accurate than *kriging* technique, but the calculation time in the second is much lower, thus, there is interest in increasing the *kriging* accuracy, implementing for example a large number of measurements points and/or overcome the Euclidean distances problem that exists in the majority of interpolators.

**Keywords:** *kriging*, geostatistic, noise map, CadnaA.

**PACS no. 43.50.Rq**

## 1 Introdução

A exposição a ruído de tráfego intenso pode produzir efeitos adversos na saúde tais como distúrbios do sono, dificuldade em relaxar, problemas relacionados com o stress entre outros [1].

Devido a esta crescente preocupação, a poluição sonora tem sido objeto de rigorosa legislação por parte da União Europeia nomeadamente com a publicação da Diretiva 2002/49/CE [2] que vem requerer a elaboração de mapas de ruído dos grandes aglomerados urbanos. Os mapas de ruído podem ser obtidos utilizando modelos de previsão acústica por forma a visualizar os descritores de ruído, como por exemplo  $L_{den}$ , expressos em escala apropriada. Os mapas de ruído constituem uma ferramenta importante no diagnóstico de problemas e no desenvolvimento de soluções [3]. A transcrição para a legislação portuguesa da referida Diretiva é feita pelo Decreto-Lei nº 9/2007 [4] que aprova o Regulamento Geral do Ruído (RGR), e que define no Artigo 3.º, mapa de ruído como “o descritor do ruído ambiente exterior, expresso pelos indicadores  $L_{den}$  e  $L_n$ , traçado em documento onde se representam as isófonas e as áreas por elas delimitadas às quais corresponde uma determinada classe de valores expressos em dB(A)”.

Em geral, é possível categorizar os métodos de elaboração de mapas de ruído em métodos de *observação* ou de *cálculo* dependendo se são baseados em medições de campo ou em simulação computacional, respetivamente. Contudo, o método mais rigoroso denomina-se de híbrido e envolve ambos [5]. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm um papel importante na preparação dos mapas de ruído, pois estes requerem bases de dados com elementos espaciais 3D, ferramentas de cálculo e grande capacidade de processamento [6]. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi o estudo numérico do ruído no *campus 2* do Instituto Politécnico de Leiria (IPL) utilizando os dois métodos (*observação* e *cálculo*) e comparando os respetivos resultados.

## 2 Área de estudo

A área de estudo considerada foi o *campus 2* do IPL conforme mostra a Figura 1. A cartografia de base contém os elementos geográficos necessários para a modelação do mapa de ruído (modelo digital de terreno - MDT, edifícios, vias de tráfego, parqueamentos, etc.)



Figura 1 – Cartografia de base (1:10 000)

### 3 Metodologia

O objetivo deste trabalho foi a obtenção de mapas de ruído para o *campus* 2 do IPL utilizando os dois métodos e comparar os respetivos resultados. Foi utilizado o *software* de previsão acústica CadnaA 4.1 baseado num algoritmo complexo que tem em conta as fontes de ruído, absorção pelo solo, reflexões em fachadas de edifícios e outras barreiras, etc. O resultado foi comparado com o cálculo efetuado com o ArcGis 9.3. Foi utilizado a técnica geoestatística *kriging* baseada em medições de ruído. O *kriging* permite a interpolação de níveis sonoros em locais não amostrados a partir de outros realizados em locais previamente selecionados.

A realização de medições de ruído e recolha de informação acústica não é uma tarefa trivial, sendo a maior parte das vezes dispendiosa e morosa, pelo que a capacidade em estimar o valor da variável em estudo em qualquer local da área pretendida se torna necessário [5].

O *kriging* (interpolador ótimo) ou Best Linear Unbiased Estimator (BLUE) tem sido muito utilizado em ciências da terra e do ambiente [7].

A metodologia seguida na preparação dos mapas está de acordo com a legislação em vigor, normas e diretrizes recomendadas quer pela Agência Portuguesa de Ambiente quer pela European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise [2], [4], [8-9].

De acordo com RGR, o indicador de ruído utilizado foi o  $L_{den}$ .

$$L_{den} = 10 \log \frac{1}{24} \left[ 13 \times 10^{\frac{L_d}{10}} + 3 \times 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right] \quad (1)$$

As medições de ruído foram efetuadas com o sonómetro Brüel & Kjær Investigator 2260, de precisão classe 1. A fonte de ruído considerada foi o ruído de tráfego, tendo sido as contagens levadas a cabo aquando das medições de ruído ambiente exterior.

#### 3.1 Método de cálculo – CadnaA

Para o método de *cálculo* foi utilizado o *software* de previsão acústica CadnaA (*Datakustik GmbH*). O método de cálculo, incluído no programa e recomendado pela Diretiva, para a modelação das vias de tráfego é o “*NMPB-Routes-96*” da norma francesa “*XPS 31-133 - Acoustique. Bruit des infrastructures de transport terrestres*” [10]. Foi necessário introduzir volumetria a alguns elementos cartográficos que se encontravam em 2D nomeadamente edifícios. As vias de tráfego foram ajustadas ao MDT ou ajustou-se o MDT às estradas consoante a situação por forma a contemplar a existência de declives e taludes.

##### 3.1.1 Malha

Tendo em conta um compromisso entre o rigor do resultado e o tempo de cálculo considerou-se uma malha de cálculo de 2 m x 2 m, como solução ótima, bem como ordem de reflexão de 1, raio de busca com alcance de 2000 m e um coeficiente de absorção pelo solo de 0,5 (default). Considerou-se uma altura de cálculo de 1,5 m, ao invés dos 4 m recomendados pela Diretiva, uma vez que se pretende no final comparar os resultados com o método de *observação*, baseado em medições realizadas a 1,5 m de altura.

### 3.1.2 Validação

Tirando partido das medições efetuadas para o método de *observação* (cerca de 90 medições em 30 locais distintos), estas foram também utilizadas para validar a contagem de tráfego. A simulação foi aceite para valores de medição inferiores  $\pm 2$  dB (A) como mostra a Figura 2.

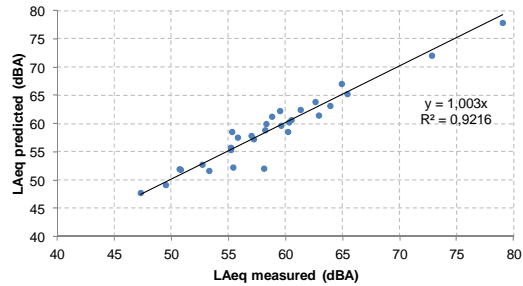


Figura 2 – Validação do modelo – valores medidos vs calculados

### 3.1.3 Resultados

O cálculo computacional demorou cerca de 150 horas e o resultado encontra-se ilustrado na Figura 3.



Figura 3 – Método de *cálculo* – CadnaA

## 3.2 Método de observação – *kriging*

### 3.2.1 Geoestatística

Em geoestatística, os métodos de estimação são baseados numa combinação linear ponderada.

$$[Z(x_0)]^* = \sum_{i=1}^N \omega_i Z(x_i) \quad (2)$$

em que  $Z(x_0)$  é o valor não amostrado,  $Z(x_i)$  é o valor da variável medida no local  $x_i$  e  $\omega_i$  é o peso de cada uma dessas variáveis amostradas e conhecidas. Resumidamente, o procedimento *kriging* é baseado em dois passos: (i) determinar o semivariograma e ajustá-lo a um modelo empírico (esférico, exponencial, Gaussiano, etc); (ii) usar o modelo para estimar os valores não amostrados. O semivariograma é dado pela equação (3):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad i=1, \dots, N \quad (3)$$

em que  $\gamma(h)$  é o valor do variograma,  $Z(x_i)$  é o valor da variável medida no local  $x_i$ , e  $N(h)$  é o número de pares de dados separados pela distância  $h$ .

O estimador linear geoestatístico, equação (2), denominado *kriging* normal, é uma combinação linear do conjunto de  $N$  variáveis vizinhas de  $x_0$  -  $Z(x_i)$ ,  $i=1, \dots, N$  que cumpre os dois critérios em relação ao erro de estimação  $\varepsilon(x_0)=[Z(x_0)]^* - Z(x_0)$ : não-enviesamento:  $E\{[Z(x_0)]^* - Z(x_0)\}=0$  e variância de estimação mínima:  $\text{Var}\{[Z(x_0)]^* - Z(x_0)\}=\min$ .

Se o método é não-enviesado sabe-se que o somatório dos pesos,  $\omega_i$ , das variáveis amostradas deve ser igual a um – equação (4). Sendo desejável minimizar a variância da estimação e sendo esta função dos pesos  $\omega_i$  é necessário igualar a zero todas as  $N$  derivadas parciais em ordem a  $\omega_i$ ,  $i=1, \dots, N$  e resolver por qualquer método conhecido o sistema de  $N$  equações a  $N$  incógnitas. No entanto, como se pretende garantir o não-enviesamento, então a minimização da variância pode ser resolvida por intermédio do formalismo de Lagrange, que implica adicionar mais uma equação (4) e, consequentemente mais uma incógnita,  $\lambda$ , ao sistema [11, 12].

$$\sum_{i=1}^N \omega_i = 1 \quad (4)$$

### 3.2.2 Kriging

Existem muitas técnicas para efetuar uma estimação local nomeadamente a média aritmética, inverso da distância e *kriging*. Os referidos métodos foram testados com o objetivo de encontrar o método que apresentasse menor erro. Os cálculos foram efetuados numa folha de Excel, nesta secção apresenta-se apenas um resumo.

Em várias aplicações ambientais se concluiu que o *kriging* normal geralmente exhibe consideráveis erros de estimação, que se devem a uma grande variabilidade nas observações. Quando a estimação se efetua em blocos, essa variabilidade diminui e consequentemente o valor médio do bloco tem um erro de estimação menor. O sistema de *kriging* em bloco é similar ao sistema *kriging* por ponto [13].

De acordo com Bivand et. al [13] um bloco escolhido ao acaso a partir do mapa foi usado como referência para os cálculos. O bloco encontra-se ilustrado na Figura 4.

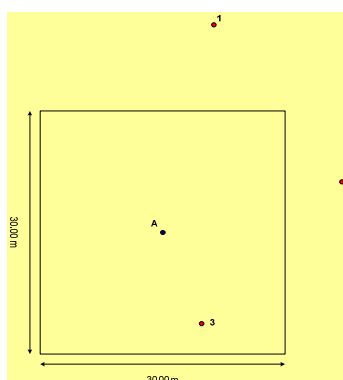


Figura 4 – Bloco A de dimensões 30 m x 30 m.

O bloco quadrado selecionado está centrado em A onde se pretende estimar o valor de  $L_{Aeq}$  ( $T^*$ ). Em torno deste bloco existe um conjunto de três amostras, nomeadamente 1, 2 e 3 que correspondem no mapa aos pontos medidos L25, L26 e L6 respetivamente. Na tabela estão as coordenadas e respetivos valores de  $L_{Aeq}$  dos pontos.

Tabela 1 - Coordenadas e respetivos valores de  $L_{Aeq}$  dos pontos

Ponto	X	Y	$L_{Aeq}$ dB (A)
	(m)	(m)	
A	-58937,44	7632,79	-----
1	-58931,08	7658,39	47,8
2	-58915,38	7638,92	57,9
3	-58932,62	7621,55	55,8

Como se pode ver na tabela 2 a média aritmética é a técnica menos rigorosa e apresenta um erro maior associado ao estimador  $T^*$  o que traduz o facto de esta técnica apenas ter em conta os valores medidos.

Tabela 2 – Resumo de resultados de  $T^*$ ,  $\sigma^2$ ,  $\sigma$

	média aritmética	inverso da distância	<i>kriging</i>
$T^*$ dB(A)	53,83	54,51	53,69
$\sigma^2$ dB(A) <sup>2</sup>	12,35	9,02	7,87
$\sigma$ dB(A)	3,51	3,00	2,80

O inverso da distância é mais rigoroso que a média aritmética porque para além dos valores medidos, tem em conta as distâncias entre as amostras atribuindo um peso maior às amostras mais próximas. O erro é portanto inferior ao da média aritmética.

Finalmente, o erro do estimador  $T^*$  obtido através do *kriging* é o menor pois esta técnica tem em conta os valores medidos, as distâncias entre os diferentes pontos e também a sua localização. Em geoestatística assume-se que pontos mais próximos apresentam mais similaridade entre eles do que pontos mais distantes [5] e [14].

Como se pode verificar na tabela 2 o método *kriging* demonstrou ser mais rigoroso e apresenta um erro de estimação menor do que a média aritmética e o inverso da distância sendo por esta razão a técnica escolhida para a obtenção do mapa baseado nos pontos observados.

### 3.2.3 Resultados

O *kriging* normal, de entre as técnicas estudadas, foi o que apresentou menor erro e por isso foi a técnica escolhida para efetuar a interpolação dos valores através da ferramenta **Geostatistical Analyst** do *software* ArcGis 9.3. O melhor ajuste para os 30 pontos de medição foi conseguindo com um semivariograma tipo esférico anisotrópico, com patamar de 90dB, uma amplitude de 100m e um efeito pepita nulo.

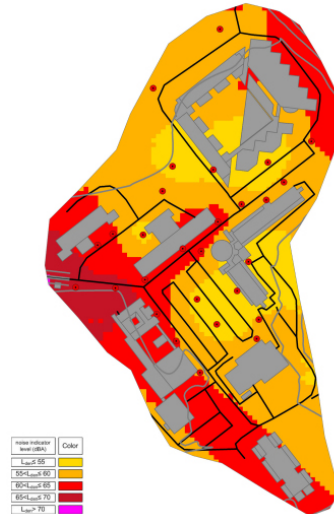


Figura 5 – Método de observação – *kriging*

## 4 Comparação dos mapas de ruído

O objetivo de efetuar os cálculos de *kriging* numa folha de Excel foi compreender melhor o método. Foram seguidas as formulações de Soares [11], Garcia [12] e de Clark [15]. A comparação entre os cálculos efetuados na folha de Excel e o mapa obtido através do ArcGis 9.3 assenta apenas no bloco centrado em A, uma vez que os cálculos de Excel estão focados neste bloco. O valor do estimador T\* obtido pelo ArcGis é de 54,2 dB(A) como se pode verificar na figura 6. O valor correspondente obtido no cálculo pelo Excel é de 53,7 dB(A). Como era expectável, estes valores encontram-se na mesma gama de valores [50 - 55] dB(A), deferindo apenas em 0,5 dB(A) como ilustra a figura 7.

Attributes	
Property	Value
FID	0
BEZ	point A
MARK	+
ID	
LP1	54,2
LP2	-12,6
LP3	0
LP4	0

Figura 6 – Detalhe para comparar os dois métodos

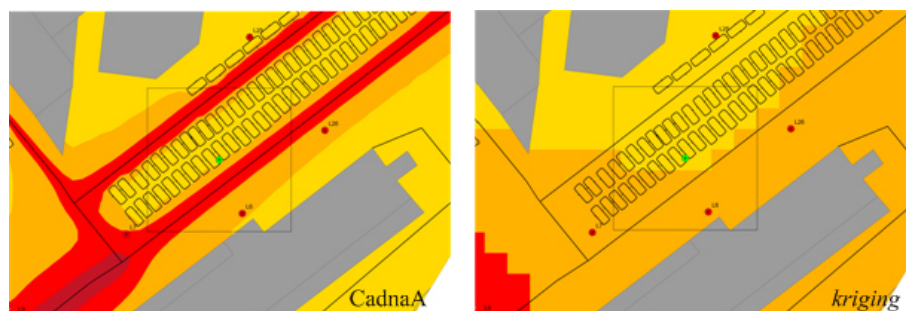


Figura 7 – Detalhe para comparar os dois métodos- mapa de ruído em torno do bloco centrado em A

Como se pode verificar os mapas acima não são similares mas existem alguns aspetos comparáveis, tais como (ver também figuras 3 e 5):

- Os valores mais elevados, acima de 60 dB(A), situam-se nas fronteiras da área de estudo devido à influência de vias de tráfego volumoso nomeadamente o IC2 e o acesso ao centro comercial.
- No centro da área de estudo os valores pertencem ao mesmo intervalo i.e.  $L_d \leq 60$  dB(A), exceto no eixo das vias que é mais pronunciado no método de *cálculo* (CadnaA).
- Na área adjacente aos edifícios os valores e a aparência nos mapas são similares.

Por último, comparando o valor calculado para o ponto central do bloco (A) por ambos os métodos, verifica-se que estes diferem 0,4 dB(A) sendo os valores obtidos pelo *kriging* e pelo CadnaA de 54,2 dB(A) e 53,8 dB(A) respetivamente.

## 5 Conclusões

A poluição sonora é um dos principais problemas da sociedade moderna tornando-se necessário compreender, documentar, avaliar e se possível minimizar. O propósito deste trabalho assentou neste pressuposto. Com o objetivo de encontrar a técnica estatística apropriada para realizar a estimação foram testadas três técnicas: média aritmética, inverso da distância e o *kriging*.

Os interpoladores, em geral, usam distâncias Euclidianas para calcular os pesos dos dados vizinhos, no caso do *kriging* estes são obtidos a partir do valor do semivariograma e são utilizados para estimar valores em locais não amostrados. A correlação entre variáveis espaciais depende da distância a que se encontram umas das outras [5], [14] e [16].

De entre as três técnicas, o *kriging* revelou ser mais rigoroso, conseqüentemente foi utilizado para a obtenção do mapa. A previsão dos níveis de ruído foi efetuada utilizando dois *softwares* distintos, o CadnaA e o ArcGis 9.3. toda a preparação, calibração do modelo e medições de ruído teve por base legislação portuguesa e europeia.

Após obtenção dos resultados de ambas simulações, as principais conclusões são:

O CadnaA apresenta-se como o mais rigoroso pois permite a modelação da propagação sonora a partir das fontes. Tem em conta o efeito barreira dos edifícios, veículos e curvas de nível. As medições



sonoras serviram para calibrar e validar o modelo. Por outro lado, o *kriging*, revelou menor rigor dado que o *input* se cingiu aos valores das medições. Foram utilizados 30 pontos, mas incrementando o número de pontos é possível aumentar a precisão.

Acusticamente, o campus apresenta níveis de ruído abaixo de 60 dB(A), conseqüentemente valores não preocupantes. Os pontos de maior impacto foram registados na fronteira da área de estudo devido à influência de vias de tráfego intenso nomeadamente do IC2 e do acesso ao centro comercial.

Considerando que o *kriging* requer um elevado número de medições mas um tempo de cálculo muito inferior ao CadnaA torna-se interessante aumentar a precisão da técnica principalmente no que diz respeito ao efeito barreira.

Se tivermos duas localizações tão próximas quanto possível mas separadas por uma barreira a correlação entre elas será fortemente afetada. Para a correlação entre duas localizações separadas por uma barreira pode ser considerada uma distância mínima que as separa sem penetrar qualquer barreira [5] e [17]. Little, Edwards e Porter [18] trabalharam na dispersão de contaminantes em estuários e ilustram este exemplo referindo que as distâncias podem ser medidas *as the crow flies, or as the fish swims*.

Como trabalho futuro, há interesse em ultrapassar o problema das distâncias Euclidianas por forma a tornar os mapas obtidos pelo *kriging* em ferramentas de planeamento a utilizar, por exemplo, pelo poder local.

## Referências

- [1] Babisch, W., Ising, H., Gallacher J.E.J. Health status as a potential effect modifier of the relation between noise annoyance and incidence of ischaemic heart disease. *Occup Environ Med*, 60, 2003, pp. 739–745.
- [2] Directive 2002/49/CE of the European Parliament and of the Council, on the assessment and management of environmental noise of 25 June, 2002.
- [3] Can, A., Leclercq, L., Lelong J. Dynamic estimation of urban traffic noise: Influence of traffic and noise source representations. *Applied Acoustics*, 69, 2008, pp. 858-867.
- [4] Decreto-Lei nº 9/2007, Regulamento Geral do Ruído, *Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional*, de 17 de janeiro, 2007.
- [5] López-Quílez, A., Muñoz, F. Geostatistical computing of acoustic maps in the presence of barriers. *Mathematical and Computer Modelling*, 50, 2009, pp. 929-938.
- [6] Henk de Kluijver, J.S. Noise mapping and GIS: optimising quality and efficiency of noise effect studies. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27, 2003, pp. 85-102.
- [7] Cressie, N., Johannesson, G. Fixed rank kriging for very large spatial data sets. *Journal of the Royal Statistical Society*, 70, 2008, pp. 209-226.
- [8] Agência Portuguesa do Ambiente, Diretrizes para a elaboração de mapas de ruído, *Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território*, versão 3, dezembro 2011.
- [9] Good Practice Guide for Strategic. Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure, *European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise*, 2003.
- [10] Norma Francesa XP S 31 – 133:2001. Acoustique. Bruit das infraestruturas de transport terrestres.

- [11] Soares, A. *Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente*. 2nd ed. IST Press, 2006.
- [12] Garcia, F.J.M. *La representación gráfica de las variables regionalizadas. Geoestadística lineal*. Universidad de Extremadura. Servicio de Publicaciones, Cáceres, 2003.
- [13] Bivand, R., Pebesma, E.J., Gómez-Rubio, V. *Applied spatial data analysis with R Springer*, 2008.
- [14] Kruvoruchko, K., Gribov, A. Geostatistical interpolation and simulation with non-euclidean distances, *geoENV IV - Geostatistics for Environmental Applications*, Barcelona, 2002.
- [15] Clark, I. Practical Geostatistics, *Geostokos Limited*, Alloa, 1979.
- [16] Goovaerts, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89 (1-2), pp. 1-45, 1999.
- [17] Curriero, F.C. On the use of non-euclidean distance measures in geostatistics. *Mathematical Geology*, 38 – 8, pp. 907-926, 2006.
- [18] Little, L.S., Edwards, D., Porter, D.E. Kriging in estuaries: as the crow flies, or as the fish swims? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 213 -1, pp. 1-11, 1997.